

B e s c h r e i b u n g

Halbleiter-Struktur

Die Erfindung betrifft eine Halbleiter-Struktur.

In der Halbleiter-Elektronik werden Bauelemente mit immer kürzeren Schaltzeiten und geringerem Leistungsbedarf gewünscht. Der Weg dahin führt über Mikrostrukturen aus Halbleitermaterialien mit möglichst kurzen Wegen für die Elektronen zwischen Injektions- und Extraktionspunkt (Kanallängen) und hohen Beweglichkeiten, das heißt mit guter Response auf äußere elektrische Felder.

10 Im Labor werden Standardwerte für sogenannte High Electron Mobility Transistoren (HEMT) bei Kanallängen $< 1 \mu\text{m}$ mit Beweglichkeiten $\mu_e > 10^6 \text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ und Schaltzeiten $< 10 \text{ps}$ erreicht. In einem HEMT werden mehrere gut definierte Schichten aus verschiedenen Halbleitermaterialien, z. B. aus GaAs und AlGaAs mit Dicken im Bereich von Nanometern, das heißt bis hinunter zu einigen Atomlagen, und definiert dotiert mit verschiedenen elektrisch aktiven Fremdatomen hergestellt. Diese Schichten sind in der Ebene lateral auf Bruchteile von

15 μm strukturiert.

20

Im HEMT ist das Prinzip der Modulationsdotierung für zwei-dimensionale Halbleiterheterostrukturen genutzt. Dabei wird durch eine einseitig planar epitaktisch aufgewachsene Halbleiterheterostruktur eine räumliche

25 Trennung von dotiertem Halbleitermaterial und dem undotierten Halbleitermaterial des Transistorkanals, in dem

sich an der Grenzfläche ein steuerbares zweidimensionales Ladungsträgergas, z. B. in Form eines Leitungsband-Elektronengases ausbildet, erzielt. Durch die Trennung von Kanal und Dotierstörstellen wird eine stark erhöhte
5 Beweglichkeit des Ladungsträgergases ermöglicht.

Im HEMT stellt sich in einer Schicht mit einer kleinen Bandlücke an der Grenzfläche zu einer zweiten Schicht mit einer großen Bandlücke eine hohe Konzentration von Ladungsträgern ein, die parallel zur Grenzfläche eine
10 hohe Beweglichkeit haben, während sie in der dritten Dimension auf einen Bereich von z. B. 10 Nanometer an der Grenzfläche eingeschränkt bleiben.

Ein Quantentopf ist eine Struktur, die für die Kristallelektronen in eine Raumrichtung als Potentialtopf mit einer Ausdehnung vergleichbar der de-Broglie-Wellenlänge wirkt. Bei den meisten Halbleitern ist dies bei Abmessungen von einigen 10 Nanometern oder weniger erfüllt. Es bildet sich ein sogenanntes, quasi zweidimensionales Elektronengas aus. Die Ladungsträger bleiben in x- und in y-Richtung frei beweglich, entlang der
15 z-Achse sind die Energieeigenwerte quantisiert.

Die hohen Anforderungen an die Perfektion derartiger Schichten und Bereiche in Nanostrukturen können durch Hetero-Epitaxie, z. B. in einer Molekularstrahl-
25 Epitaxie-Anlage, erfüllt werden. Mit solchen Verfahren werden die Strukturen zur Ausbildung eines zweidimensionalen Elektronengases hergestellt.

Wenn die Abmessungen der Leiterbahnen in die Größenordnung der Fermiwellen kommen, werden die möglichen Elektronenbahnen eingeschränkt. Dann bekommt die Quantenmechanik wegen des Wellencharakters der Elektronen einen wesentlichen Einfluss auf die stationären Zustände und auf den Transport der Elektronen.

Wird die Dimension eines zweidimensionalen Elektronengases durch laterale Strukturierung weiter eingeschränkt, werden eindimensionale oder sogar nulldimensionale, das heißt in jeder Raumrichtung eingeschränkte Systeme, sogenannte Quantendots, realisiert.

Aus dem Stand der Technik sind Verfahren zur Herstellung von Strukturen bekannt, in denen die freien Elektronen oder Löcher in bestimmten Raumrichtungen auf Nanometerbereiche eingeschränkt sind.

Derartige Bauelemente, die auf ein- oder nulldimensionalen Halbleiterstrukturen basieren, sind aufgrund quantenmechanischer Effekte vielversprechende Systeme für verbesserte Transistor- und Dioden-Bauelemente und neuartige Quanten-Nano-Bauelemente. Die Dimensionsreduktion in zwei bzw. drei Raumrichtungen zu, in Bezug auf die Ladungsträger-Beweglichkeit, ein- bzw. nulldimensionalen Strukturen, basiert auf der Quantisierung der eingeschränkten Freiheitsgrade der freien Ladungsträger. Dazu muss die de-Broglie-Wellenlänge des Ladungsträgers, also des Kristall-Elektrons oder des Kristall-Lochs von der Größenordnung der Abmessungen der eingeschränkten Raumrichtungen sein.

Aus Björk et al. (Björk, M.T., Ohlsson, B.J., Sass, T., Persson, A.I., Thelander, C., Magnusson, M.H., Deppert, K., Wallenberg, L.R., Samuelson, L. (2002), One-dimensional heterostructures in semiconductor nanowhiskers. Applied Physics Letters 80, 1058) ist epitaktisches und teilweise selbstorganisiertes Wachstum von eindimensionalen Halbleiterheterostrukturen, sogenannten Whiskern, bekannt.

Aus Panev et al. (Panev, N., Persson, A.I., Sköld, N., L. Samueleson (2003), Sharp exciton emission from single InAs Quantum dots in GaAs nanowires. Applied Physics Letters 83, 2238) ist bekannt, Ladungsträger aus einem GaAs-Substrat in eine InAs-Insel über einen nanowire aus GaAs zu transportieren und Lumineszenz zu erzeugen.

Nachteilig zeigen diese Strukturen eine schlecht steuerbare Ladungsträger-Konzentrationen im Quantendot.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine einfach aufgebaute Halbleiter-Struktur bereit zu stellen, mit der eine hohe Konzentration freier Ladungsträger eingestellt und deren räumlicher Verlauf in einem null- oder eindimensionalen Quantentopf gezielt gesteuert werden kann.

Die Aufgabe wird durch eine Halbleiter-Struktur gemäß Hauptanspruch gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den darauf rückbezogenen Patentansprüchen.

Erfindungsgemäß weist die Halbleiter-Struktur mindestens einen ersten Materialbereich und einen zweiten Materialbereich auf. Der zweite Materialbereich umschließt den ersten Materialbereich und ist epitaktisch auf dem ersten Materialbereich angeordnet. In der Halbleiter-Struktur liegt Fermi-Level-Pinning an der, der Grenzfläche beider Materialbereiche gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Außenfläche vor, wodurch der erste Materialbereich einen Quantentopf für freie Ladungsträger ausbildet.

Vorteilhaft ist der Quantentopf durch Fermi-Level-Pinning nicht gestört.

~~Der erste Materialbereich bildet einen Quantentopf für~~
freie Ladungsträger aus, so dass diese quantenmechanisch null- oder eindimensional in ihrer Freiheit eingeschränkt sind, bzw. die Zustände für Ladungsträger liegen 0-d oder 1-d vor.

Dadurch wird vorteilhaft bewirkt, dass im Quantentopf des ersten innen angeordneten Materialbereichs eine hohe Konzentration und Beweglichkeit an Ladungsträgern vorliegt, ohne dass dieser Materialbereich hoch dotiert sein muss. Im Gegensatz zum Stand der Technik ist besonders vorteilhaft eindimensionaler Ladungsträger-Transport im ersten Materialbereich bzw. Quantentopf gezielt einstellbar, was zur Herstellung von Transistoren mit hoher Ladungsträger-Beweglichkeit genutzt werden kann.

Neben eindimensionalen Quantenstrukturen, wie Whiskern und lithographisch hergestellten MESAstrukturen, sind

besonders vorteilhaft auch Inseln ohne Fermi-Level-Pinning an der Grenzfläche des Quantentopfes herstellbar. Die Whisker können mit weiteren Heterostrukturen ausgebildet werden, z. B. mit GaAs / AlGaAs- oder GaN / AlGaN-Bereichen als verarmte Strukturen.

Damit ist vorteilhaft gewährleistet, dass die positiven Eigenschaften dieser Halbleiter-Strukturen auch in räumlich übergeordneten Strukturen bis hin zu Lasern und Transistoren ausgenutzt werden.

Das energetische Minimum des Quantentopfs des ersten Materialbereichs liegt entweder unterhalb der Fermi-Energie im Gleichgewicht oder aber weist einen Abstand kleiner gleich $k_B T$ zur Fermi-Energie auf. Dann ist vorteilhaft gewährleistet, dass genügend Ladungsträger im Quantentopf sind und für Transistoren, Dioden und so weiter genutzt werden können.

Die Abmessung bzw. der Durchmesser des ersten Materialbereichs sind so klein, dass die Ladungsträgerbeweglichkeit in mindestens zwei Raumrichtungen quantenmechanisch eingeschränkt ist.

Der erste Materialbereich ist so zum zweiten Materialbereich angeordnet, bzw. ist von diesem so umwachsen, dass das unerwünschte Fermi-Level-Pinning von der Grenzfläche der beiden Materialbereiche, zu der dieser Grenzfläche gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Außenfläche, des zweiten Materialbereichs verschoben ist. Das Fermi-Level-Pinning tritt dann an der nicht epitaktischen Außenfläche des zweiten Materialbereichs zu gegebenenfalls weiteren Materialbereichen auf. Sind wei-

tere epitaktische Grenzflächen am zweiten Materialbereich angeordnet, so tritt Fermi-Level-Pinning an der ersten nicht epitaktischen Außenfläche auf.

5 In der Halbleiter-Struktur soll der kürzeste Abstand des Quantentopfes vom Mittelpunkt aus zur nicht epitaktischen Außenfläche, an der das Fermi-Level-Pinning vorliegt, dabei größenordnungsmäßig die Verarmungslänge d nicht unterschreiten. Eine Definition der Verarmungslänge kann Lüth (Lüth H (1996). Surfaces and interfaces
10 of solid materials. 3rd edition, Springer Study Edition, Seite 458) entnommen werden. Die Verarmungslänge ist eine dotierungsabhängige Materialgröße.

~~Dadurch wird vorteilhaft bewirkt, dass die Konzentration~~
on freier Ladungsträger und ihres räumlichen Verlaufes
15 in derartigen ein- und nulldimensionalen Halbleiter-Strukturen mit Hilfe einer lateralen epitaktischen Umwachsung gegebenenfalls mit Dotierung und/oder Grenzflächen-Polarisationsladungen eingestellt und gesteuert werden kann. Aus Dotieratomen des zweiten Materialbereichs können Ladungsträger in den ersten Materialbereich gelangen. Ein oder mehrere optionale äußere Gates
20 können die Ladungsträger-Konzentration im ersten Materialbereich steuern, ohne dass das unerwünschte Fermi-Level-Pinning an der Grenzfläche des ersten zum zweiten Materialbereich diese beeinflusst.
25

Die nicht epitaktischen Grenz- oder Außenflächen der Halbleiter-Struktur zeigen Fermi-Level-Pinning aufgrund von Grenzflächenzuständen. Je nach energetischer Position des Fermi-Level-Pinnings der Struktur, ergeben
30 sich zwei Fälle: Die Verarmung oder die Anreicherung

freier Ladungsträger im Halbleiter nahe der Grenzfläche. Dieser Umstand wird im Rahmen der Erfindung für die Ladungsträger-Konzentration im Quantentopf genutzt. Das gemäß Stand der Technik an der Grenzfläche zwischen zwei Materialbereichen vorhandene Fermi-Level-Pinning wird auf Grund geeigneter Wahl der Materialien oder der Abmessungen und/oder gegebenenfalls der Dotierung der beiden Materialbereiche an die erste nicht epitaktisch ausgebildete Grenzfläche eines äußeren Materialbereichs verschoben und hat somit keinen oder zumindest weniger Einfluss auf die Ladungsträger-Konzentration und Beweglichkeit im Quantentopf des ersten Materialbereichs. Dies wird zur Steuerung der Ladungsträger-Konzentration in dem Quantentopf mittels Elektroden genutzt.

Für die Klasse der grenzflächenverarmten Halbleiter mit GaAs, InP, oder GaN als Materialien für den ersten Materialbereich ist die Konzentration freier Ladungsträger in daraus hergestellten Bauelementen, insbesondere mit Durchmessern in der Größenordnung der Verarmungslänge und kleiner, verschwindend gering und praktisch nicht beeinflussbar durch externe Größen, wie z. B. Elektroden. Auch zu hohe Dotierungen können auf Grund des negativen Einflusses auf die Ladungsträger-Beweglichkeit und auf die Steuerung nicht verwendet werden. Eine solche verarmte Struktur ist für elektronische Bauelemente unbrauchbar.

Es wurde weiterhin erkannt, dass für die Klasse der grenzflächenangereicherten Halbleiter mit z. B. InAs, InSb, und anderen sogenannten narrow-gap Materialien für den ersten Materialbereich die Konzentration freier Ladungsträger räumlich nahe der Grenzfläche zwischen

erstem und zweiten Materialbereich praktisch unveränderlich ist und eine Materialgröße darstellt. Die freien Ladungsträger liefern metallähnliche Eigenschaften, insbesondere elektronische Transporteigenschaften und optische Response. Sie sind praktisch nicht beeinflussbar durch Dotierung und/oder externe Größen, wie z. B. Elektroden. In Bauelementen aus grenzflächenangereicherten Materialien, insbesondere mit Abmessungen in der Größenordnung der Anreicherungslänge, werden die elektronischen Eigenschaften praktisch durch die freien Ladungsträger nahe der Grenzfläche dominiert und sind somit unveränderbar. Eine solche Struktur ist für elektronische Transistor-Bauelemente mit Steuerelektroden ebenfalls unbrauchbar.

Die gegebenenfalls dotierten Materialien und/oder die Dicke der beiden Materialbereiche in der Halbleiter-Struktur werden erfindungsgemäß zur Ausbildung eines gezielt mit Ladungsträgern versorgten ersten Materialbereichs so ausgewählt, dass das Fermi-Level-Pinning von der Grenzfläche an die der Grenzfläche gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Grenzfläche des zweiten Materialbereichs verschoben ist. Gegebenenfalls ist mindestens ein weiterer epitaktisch oder nicht epitaktisch angeordneter Materialbereich auf dem zweiten Materialbereich angeordnet.

In dem Fall, dass dieser weitere Materialbereich epitaktisch auf dem zweiten Materialbereich angeordnet ist, bildet er vorteilhaft einen beständigen Abschluss der Halbleiter-Struktur, bevor weitere Schichten z. B. mit Gate-Funktion angeordnet werden.

Das Material des weiteren Materialbereichs kann zwecks Passivierung der Halbleiter-Struktur identisch zum Material des ersten Materialbereichs sein.

5 Die Halbleiter-Struktur kann auch ein Metall als Material für den weiteren Materialbereich umfassen.

Der erste Materialbereich weist in einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung eine Abmessung bzw. einen Durchmesser von kleiner 100 Nanometern, insbesondere eine von 0,5 bis 50 Nanometern, auf.

10 Eine Halbleiter-Struktur mit derartigen Abmessungen des ersten Materialbereichs ist gemäß Stand der Technik besonders anfällig gegenüber Fermi-Level-Pinning und kann hier erstmalig mit hoher Ladungsträger-Konzentration bereit gestellt werden.

15 Als eine besonders vorteilhafte Halbleiter-Struktur ist GaAs als Material für den ersten Materialbereich und/oder AlGaAs als Material für den zweiten Materialbereich vorgesehen. Diese Materialien sind wegen der quasi-Gitteranpassung epitaktisch gut miteinander in
20 Verbindung zu bringen und dann praktisch versetzungs-frei zueinander angeordnet. Ohne Einschränkung der Erfindung können aber andere Halbleiter-Strukturen mit derartig gitterangepassten Materialbereichen verwendet werden.

25 Der zweite Materialbereich kann durch Dotierung ein beliebiges auch inhomogenes Dotierprofil aufweisen. Es ist aber auch möglich Polarisationsladungen an der Grenzfläche zwischen dem ersten und dem zweiten Materialbereich zur Optimierung des Ladungsträgerprofils im

Quantentopf zu nutzen. Die Polarisationsladungen werden abhängig von der kristallographischen Ausrichtung der Grenzflächenbereiche in Beziehung zu den Achsen des Gesamtkristalls genutzt, so dass Dotierungen im zweiten Materialbereich auch vermieden werden können.

Der zweite Materialbereich kann mehrere, schellenartig und epitaktisch zueinander angeordnete Flächen aufweisen. Der zweite Materialbereich kann z. B. von der Grenzfläche zum ersten Materialbereich aus GaAs ausgehend, aus einer Abfolge von 20 Nanometer dicken Bereichen aus $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$, AlAs und $\text{Al}_{0,51}\text{Ga}_{0,49}\text{As}$ bestehen.

Ein dünner, undotierter oder niedrig dotierter Spacer schließt den zweiten Materialbereich nach außen ab. Der Spacer verringert die Streuung von Ladungsträgern innerhalb des ersten Materialbereichs. Der erste Materialbereich aus GaAs wird von dieser Abfolge umschlossen. Der erste Materialbereich kann hingegen in Längsrichtung, also senkrecht zum zweiten Materialbereich Heterostrukturen aufweisen.

Der erste und der zweite Materialbereich können somit beliebig durch gesondert abgreifbare Heterostrukturen unterbrochen sein. Dadurch sind z. B. resonante Tunnelioden herstellbar.

Der erste Materialbereich der Halbleiter-Struktur soll bei geringer lateraler Ausdehnung von beispielsweise weniger als 50 Nanometern eine Ladungsträger-Konzentration von mindestens 10^{10} cm^{-3} , insbesondere eine Ladungsträger-Konzentration von mindestens 10^{16} cm^{-3} aufweisen. Es können ein oder mehrere Gates zur Steuerung der Ladungsträger-Konzentration angeordnet sein.

Im weiteren wird die Erfindung an Hand von Ausführungsbeispielen und der beigefügten Figuren näher beschrieben.

Fig. 1 zeigt einen Ausschnitt des elektronischen Bänder-
5 derschemas für eine Halbleiter-Struktur gemäß Stand der
Technik. Die Leitungsbandkante (E) für Elektronen ist
als Funktion der radialen Position x innerhalb einer
großen und daher nur partiell verarmten Struktur wie-
dergegeben. Der Fall der Valenzbandkante für Löcher ist
10 analog. Diese Bandkante ist Potential für Ladungsträ-
ger.

Der Abstand a sei gemäß Stand der Technik groß und gibt
die Abmessung eines ersten Materialbereichs 1 an, auf
dem nicht epitaktisch ein zweiter Materialbereich 3
15 (nicht dargestellt), z. B. ein Metall, Gas oder Kunst-
stoff oder sonstiger Isolator oder Halbleiter angeord-
net ist. Der Abstand d ist die Verarmungslänge ausge-
hend vom Fermi-Level-Pinning der Grenzfläche 2 des be-
trachteten Halbleiters. Bei partiell verarmter Struktur
20 ist $d \ll a$ und daher relativ unschädlich für den La-
dungsträgertransport in der Grenzfläche 2 zwischen bei-
den Materialbereichen. Die verarmten Bereiche des Mate-
rialbereichs 1 weisen aufgrund $d \ll a$ nur einen kleinen
Anteil an der Gesamtstruktur auf. An der nicht epitak-
25 tischen Grenzfläche tritt aufgrund von Grenzflächenzu-
ständen das Fermi-Level-Pinning mit einer energetischen
Größe gemäß des Pfeils 5 auf.

Die Fermienergie (=Fermi-Level) im Gleichgewicht ist
durch die Punkt-Strich-Linie 4 dargestellt. Der energie-

tische Wert des Fermi-Level-Pinnings, ist gemäß Pfeil 5 ein fixierter, energetischer Abstand von der Leitungsbandkante an der Stelle der Grenzfläche 2 aufgrund von Grenzflächenzuständen.

5 Fig. 2 zeigt eine weitere Leitungsbandkante E für Elektronen in einer Halbleiter-Struktur als Funktion der radialen Position x. Hier ist die Abmessung von Materialbereich 1 im Vergleich zu der Halbleiter-Struktur der Fig. 1 sehr klein gewählt und Materialbereich 1 ist
10 daher komplett verarmt. Der Fall der Valenzbandkante für Löcher ist analog. Diese Bandkante ist Potential für Ladungsträger.

Der Abstand a stellt erneut die räumlichen Abmessungen von Materialbereich 1 dar (z. B. 20 Nanometer). Auf Materialbereich 1 ist der Materialbereich 3 (nicht dargestellt) nicht epitaktisch angeordnet. Der Materialbereich 3 besteht z. B. aus einem Metall oder einem Gas, Kunststoff oder sonstigem Isolator oder Halbleiter.

Der Abstand d stellt wiederum die Verarmungslänge dar.
20 In diesem Fall ist die Verarmungslänge d größer als die Abmessungen a des Materialbereichs 1. Das Potentialminimum des ausgebildeten Quantentopfes ist durch Pfeil 6 dargestellt. Das Potentialminimum liegt aufgrund $d > a$ energetisch weit oberhalb zu $k_B T$ (T =Temperatur, $k_B T$ =Boltzmann-Konstante) der Fermienergie im Gleichgewicht, dargestellt durch die Punkt-Strich-Linie 4. Die Grenzfläche 2 zwischen Materialbereich 1 und Materialbereich 3 ist daher vollständig verarmt. Die Grenzfläche 2 weist aufgrund von Grenzflächenzuständen Fermi-
25

Level-Pinning (siehe Pfeil 5) auf. Pfeil 5 gibt das energetische Niveau des Fermi-Level-Pinnings wieder. Es wird deutlich, dass ein fixierter, energetischer Abstand der Leitungsbandkante an der Stelle der Grenzfläche 2 aufgrund von Grenzflächenzuständen vorliegt.

Aus diesen Ausführungen wird deutlich, dass für die Klasse grenzflächenverarmter Halbleiter gemäß Stand der Technik, wie z. B. GaAs, InP und GaN, frei oder auf einem Substrat, die Konzentration freier Ladungsträger in daraus hergestellten Bauelementen, insbesondere mit Abmessungen kleiner 100 Nanometern und in der Größenordnung der Verarmungslänge und kleiner, sehr gering und praktisch nicht beeinflussbar durch externe Größen, wie z.B. Elektroden ist. Die Verarmungslänge ist zwar eine dotierungsabhängige Materialgröße. Allerdings kann bei derartigen Abmessungen auch mit hoher Dotierung in GaAs als Material für die erste Schicht auf Grund der dann auftretenden starken Störstellenstreuung mit schlechter Beweglichkeit der Ladungsträger kein brauchbarer Transistor / Tunnelodiode hergestellt werden.

Simulationen zeigen, dass trotz hoher Dotierung praktisch eine vollständig verarmte Struktur dieses Typs bestehen bleibt. Es tritt immer Fermi-Level-Pinning an der Grenzfläche 2 bei etwa 0,65 eV gegen die Leitungsbandkante E auf, so dass die Halbleiter-Struktur aus Materialbereich 1 (30 Nanometer GaAs, n-dotiert mit 10^{18} cm^{-3}) und Materialbereich 3 (Metall, Luft und so weiter) vollständig verarmt ist ($T=300\text{K}$).

Fig. 3 zeigt die Leitungsbandkante (E) als Funktion der radialen Position (x) innerhalb einer erfindungsgemäßen Halbleiter-Struktur. In Fig. 3 ist schematisch die Leitungsbandkante E entlang des Querschnitts einer erfindungsgemäßen eindimensionalen Halbleiter-Struktur dargestellt. Ein Querschnitt der Materialbereiche ist schematisch der Fig. 4 entnehmbar.

Die Halbleiter-Struktur umfasst einen ersten Materialbereich 1 mit der Abmessung a, welcher von einem zweiten Materialbereich 3 epitaktisch umwachsen ist. Materialbereich 1 ist eine Insel oder ein Whisker. Der Materialbereich 3 ist epitaktisch auf dem Materialbereich

1 angeordnet. Der Fall der Valenzbandkante für Löcher ist analog. Diese Bandkante ist ein Potential für Ladungsträger.

Die Materialien beider Bereiche 1, 3 werden so gewählt, dass das Material des ersten Materialbereichs 1 den Quantentopf ausbildet. Der Quantentopf liegt auf dem Niveau der Fermi-Energie E_F , dessen energetisches Niveau durch die Punkt-Strich-Linie angedeutet ist. An der Grenzfläche 2 zwischen dem ersten Materialbereich 1 und dem epitaktisch hierzu angeordneten Materialbereich 3 ist die Leitungsbandkante E abgesenkt im Vergleich zum Materialbereich 3.

Es tritt ein Potentialsprung an der Heterointerface-Grenzfläche 2 auf (Band-Diskontinuität). An der Grenzfläche 2 tritt aber kein Fermi-Level-Pinning auf, wie gemäß Stand der Technik, sondern vielmehr an der ersten nicht epitaktischen Grenzfläche 6 zwischen zweitem Ma-

terialbereich 3 und einem optional auf diesem angeordneten, gegebenenfalls Materialbereich 3 umwachsenden weiteren Materialbereich 5, welches als cap-Material der Halbleiter-Struktur fungiert. Der optional angeordnete Materialbereich 5 dient der Passivierung der dadurch umwachsenen Halbleiter-Struktur. In dem Fall, dass Schicht 5 nicht epitaktisch auf Schicht 3 angeordnet ist, läge das Fermi-Level-Pinning an der Grenzfläche 4.

- 10 Die Grenzfläche 6 der Halbleiterstruktur weist Fermi-Level-Pinning aufgrund von Grenzflächenzuständen auf. Die gesamte Halbleiter-Struktur wird von einem nicht epitaktischen Material, z. B. einem Isolator 7 oder einem Metall 7 oder einem nicht epitaktischen Halbleiter 15 7, umgeben. Als Isolator kann z. B. ein Gas wie Luft oder Kunststoff vorliegen.

- Der energetische Wert des Fermi-Level-Pinnings, dargestellt durch Pfeil 9, und damit der Abstand des an der Grenzfläche 6 fixierten energetischen Abstands der Leitungsbandkante E vom Fermi-Level 8 im Gleichgewicht ist 20 durch die Pfeile 9 dargestellt.

- Wie ersichtlich, ist das an der Grenzfläche 6 auftretende Fermi-Level-Pinning durch geeignete Wahl der Materialien von Schichten 1 und 3, den Abmessungen dieser 25 Schichten und gegebenenfalls deren Dotierungen so weit von der Grenzfläche 2 entfernt, dass die von Grenzfläche 6 ausgehende Verarmungslänge d den Quantentopf nicht negativ beeinflusst, so dass Ladungen gezielt in diesen Bereich eingebracht werden können. In der Halb-

leiter-Struktur soll der kürzeste Abstand des Quantentopfes zur nicht epitaktischen Außenfläche 6 (Fermi-Level-Pinning) dabei größenordnungsmäßig die Verarmungslänge d nicht unterschreiten.

5 Fig. 4 zeigt einen Ausschnitt eines radial geschnittenen Querschnitts durch einen gemäß Fig. 3 umwachsenen Whiskers. Der innere Materialbereich 1, wird epitaktisch vollständig von Materialbereich 3 umwachsen. Es kann optional cap-Material 5 epitaktisch auf Materialbereich 3, und auf dem cap-Material 5 optional metallisches Schottky-Gate-Material 7 angeordnet sein. Auch
10 die übrigen Bezugszeichen entsprechen denen der Fig. 3.

Als erfindungsgemäße Halbleiter-Strukturen kommen insbesondere GaAs als Material von Bereich 1 und AlGaAs
15 als Material von Bereich 3 in Frage.

Eine Simulation (Fig. 5) zu den beiden Halbleiter-Strukturen gemäß der Fig. 3, 4 demonstriert die erfindungsgemäße Wirkungsweise der lateralen epitaktischen Umwachsung und die gegenüber dem Stand der Technik
20 deutlich erhöhte freie Ladungsträger-Konzentration im Inneren der Struktur, das heißt im Quantentopf von Materialbereich 1. Die Abmessung der Umwachsung und deren Dotierung sind so gewählt, dass die freien Ladungsträger zur Erhöhung der Beweglichkeit im Inneren maximiert
25 sind, räumlich getrennt von Dotierung und Grenzflächen. Eine erfindungsgemäße Änderung der Materialien und/oder Materialdicken und/oder Dotierungen ermöglicht eine definierte Variation der freien Ladungsträgerkonzentration und/oder räumlichen Verteilung.

In Fig. 5 ist eine näherungsweise Simulation zu einem zweidimensionalen Schichtpaket mit selbstkonsistentem Hartree-Potential, LDA-Austausch und quantenmechanischer Berechnung der Elektronenladungen (freie Ladungsträger) gezeigt.

Simuliert wurde der Fall eines undotierten, 20 Nanometer dicken Materialbereichs 1 aus GaAs, der von einem 15 Nanometer dicken Materialbereich 3 aus $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ vollständig umwachsen war. Materialbereich 3 ist n-dotiert mit $3,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ und vollständig ionisiert. Ein undotierter, 5 nm dicker Materialbereich 5 aus GaAs ist zum Schutz gegen Oxidation des Al in Materialbereich 3 auf diesem angeordnet. Der Materialbereich 5 ist an ein nicht epitaktisches metallisches Außenmaterial 7 (z. B. Schottkykontakt) angeordnet.

Die Fermienergie ist erneut strichpunktiert dargestellt. Im oberen Diagramm a) ist der Verlauf der Leitungsbandkante (Potential) als Funktion der Position (z) dargestellt. Im unteren Diagramm b) ist der Verlauf der freien Ladungsträgerkonzentration (Charge) als Funktion der Position (z) dargestellt. Es tritt Fermi-Level-Pinning erst an der Grenzfläche 6 bei etwa 0,65 eV gegen Leitungsbandkante E auf (s. Fig. 4). Es wurde nur der rechte Teil mit Bezugszeichen 1 bis 7

Es wird deutlich, dass im Bereich des Materialbereichs 1 eine gezielte Ladungsträger-Konzentration in Höhe von bis zu $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ erreicht wird. Dies ist ein Wert, der um etwa 10^9 höher liegt, als bisher bekannt. Diese An-

reicherung von Ladungsträgern im Materialbereich 1 mit Abmessungen von 20 Nanometern und kleiner kann je nach Anwendungsfall für optische Zwecke (null-dimensionale Umwachsung einer Insel), Transistoren oder resonante Tunnelndioden oder Superlattices (ein-dimensionale Umwachsung von Whisker-Strukturen) oder andere Stack-Strukturen innerhalb eines Whiskers mit mehreren Transistoren und Gates und/oder Heterostrukturen innerhalb des Whiskers genutzt werden.

10 An Stelle der beschriebenen GaAs-AlGaAs-Halbleiter-Struktur kann ohne jegliche Einschränkung der Erfindung eine Halbleiter-Struktur aus den nachfolgend genannten Materialien verwendet werden:

- 15 - $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ (Materialbereich 1) und $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (Materialbereich 3), mit $x > y$ zur Ausbildung der Stufe im Quantentopf (Banddiskontinuität);
- InP (Materialbereich 1) und $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$, mit einem Wert x , der eine Gitteranpassung an InP ermöglicht;
- 20 - $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (Materialbereich 1) und InP (Materialbereich 3), mit einem Wert x , der eine Gitteranpassung an InP ermöglicht;
- $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ (Materialbereich 1) und $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, mit $x > y$;
- 25 - Si (Materialbereich 1 oder 3) und $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ (Materialbereich 1 oder 3), je nach Kristallverspannung und ob Elektronen oder Löcher gewünscht sind;

- ZnO (Materialbereich 1) und $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (Materialbereich 3);
- InAs (Materialbereich 1) und AlSb (Materialbereich 3).

5 Die Halbleiter-Strukturen können sowohl Verarmungs- als auch Anreicherungsstrukturen darstellen.

Fig. 6a, b zeigen schematisch in Perspektive die typische Geometrie der betrachteten ein- und null-

dimensionalen Strukturen. Die konkrete geometrische

10 Formgebung (z. B. rund, quadratisch, hexagonal) in den Figuren ist nur zur Veranschaulichung gewählt und all-

gemein nicht eingeschränkt. Fig. 6a zeigt schematisch den nulldimensionalen Fall der Umwachsung einer Insel

mit innerem Materialbereich 1 und äußerem Materialbe-

15 reich 2. Fig. 6b zeigt schematisch den eindimensionalen Fall der Umwachsung eines Whiskers mit innerem Materi-

albereich 1 und äußerem Materialbereich 2.

P a t e n t a n s p r ü c h e

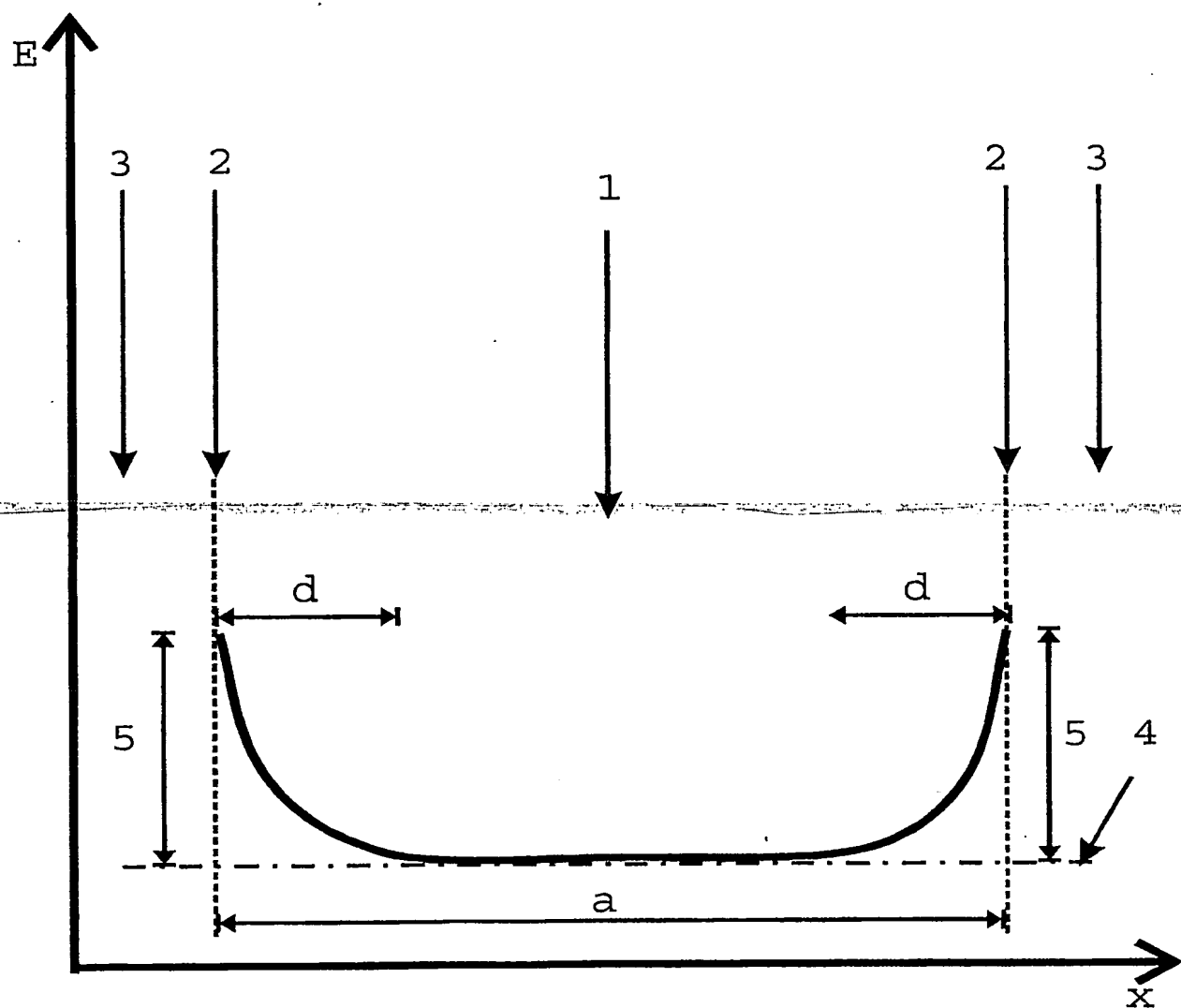
-
1. Halbleiter-Struktur aus mindestens einem ersten Materialbereich (1) und einem zweiten Materialbereich (3), wobei der zweite Materialbereich (3) den ersten Materialbereich (1) epitaktisch umschließt und
5 eine Grenzfläche (2) ausbildet,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Materialien des ersten und zweiten Materialbereichs (1, 3) und/oder deren Abmessungen
10 und/oder deren Dotierungen so beschaffen sind, dass
ein Fermi-Level-Pinning (9) an der, der Grenzfläche (2) beider Materialbereiche (1, 3) gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Grenzfläche (4) des zweiten Materialbereichs (3) vorliegt und der erste Materialbereich (1) einen Quantentopf für freie La-
15 dungsträger ausbildet.
2. Halbleiter-Struktur aus mindestens einem ersten Materialbereich (1) und einem zweiten Materialbereich (3), wobei der zweite Materialbereich (3) den ersten Materialbereich (1) epitaktisch umschließt und
20 eine Grenzfläche (2) ausbildet,
dadurch gekennzeichnet,
dass ein Fermi-Level-Pinning (9) an der, der Grenzfläche (2) beider Materialbereiche (1, 3) gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Grenzfläche (4)
25 des zweiten Materialbereichs (3) vorliegt und der erste Materialbereich (1) einen Quantentopf für freie Ladungsträger ausbildet.

3. Halbleiter-Struktur nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Fermi-Level-Pinning (9) durch Wahl des Ma-
terials und/oder der Abmessung und/oder der Dotie-
5 rung und/oder des Dotierprofils einer oder beider
Materialbereiche (1, 3) bestimmt wird.
4. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden
Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
10 dass auf dem zweiten Materialbereich (3) ein weite-
rer Materialbereich (5) epitaktisch angeordnet ist,
so dass Fermi-Level-Pinning erst an der, der epi-
taktischen Grenzfläche (4) zwischen zweitem und
weiterem Materialbereich (3, 5) gegenüberliegenden
15 nicht epitaktischen Grenzfläche (6) vorliegt.
5. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden
Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass der erste Materialbereich (1) eine Abmessung a
20 in x-Position von kleiner 100 Nanometern, insbeson-
dere von 0,5 bis 50 Nanometern, aufweist.
6. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden
Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
25 dass der kürzeste Abstand des Quantentopfes zur
nicht epitaktischen Grenzfläche (4, 6), an der das
Fermi-Level-Pinning vorliegt, die Verarmungslänge d
nicht unterschreitet.

7. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch
ein Material für den weiteren Materialbereich (5),
5 das identisch ist zu dem Material des ersten Materialbereichs (1).
8. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch
10 ein Metall als Material für den weitere Materialbereich (5).
9. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
15 dass die Materialien des ersten und zweiten Materialbereichs (1, 3) quasi-Gitteranpassung zeigen und versetzungsfrei zueinander angeordnet sind.
10. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch
20 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ und $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ als Materialien für den ersten bzw. zweiten Materialbereich (1, 3), mit $x > y$ zur Ausbildung einer Stufe im Quantentopf (Banddiskontinuität).
- 25 11. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
bei der im ersten Materialbereich (1) eine Konzentration freier Ladungsträger von mindestens 10^{10} cm^{-3} , insbesondere von mindestens 10^{16} cm^{-3} vorliegt.

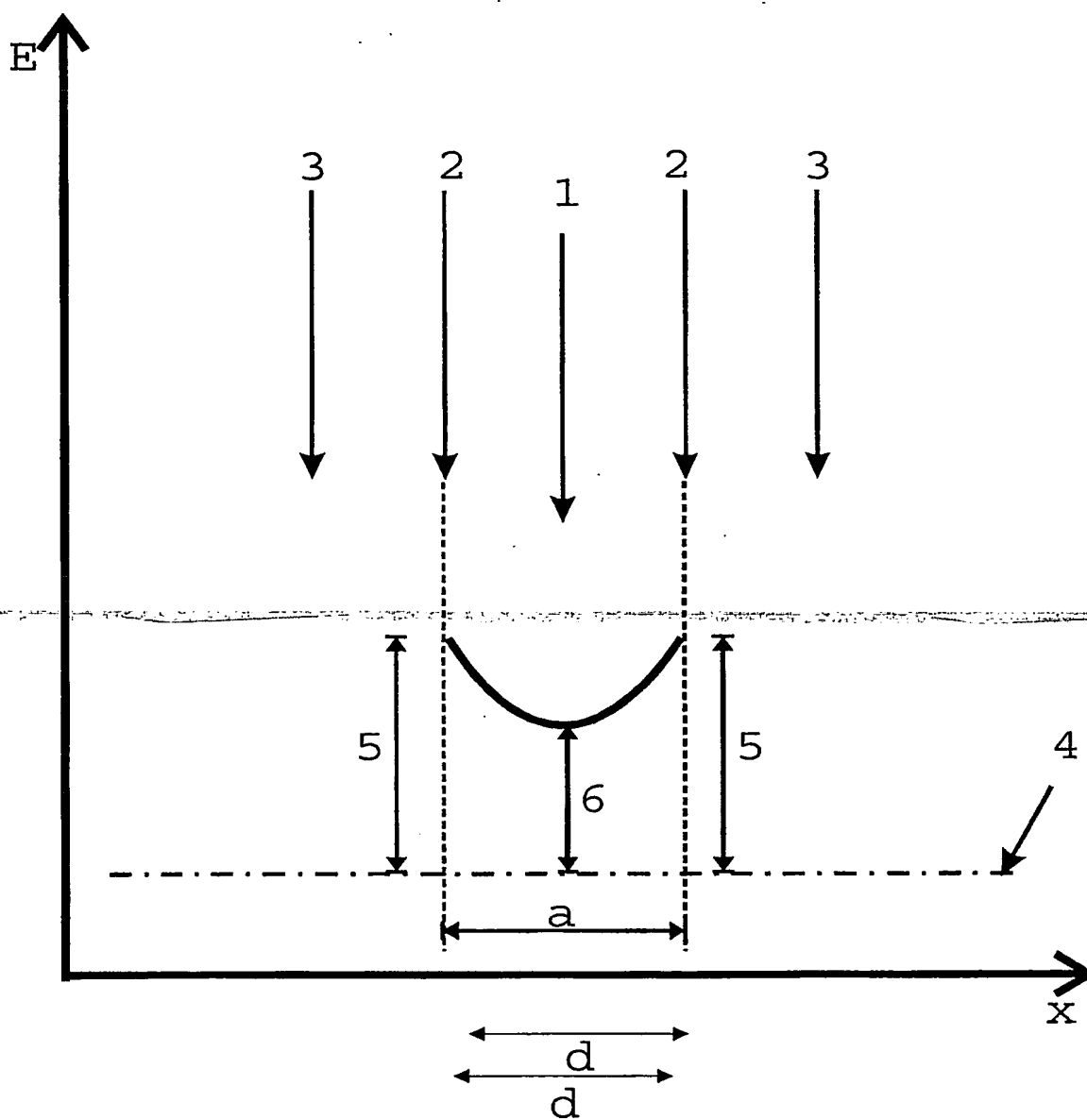
12. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
diese zumindest teilweise Metall- (Schottky)-
5 Elektroden (7) mit Gate-Funktion zur Steuerung der
Ladungsträger umfasst.

13. Transistor, Laser, resonante Tunneldiode oder andere Heterostruktur umfassend eine Halbleiter-
Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1
10 bis 12.



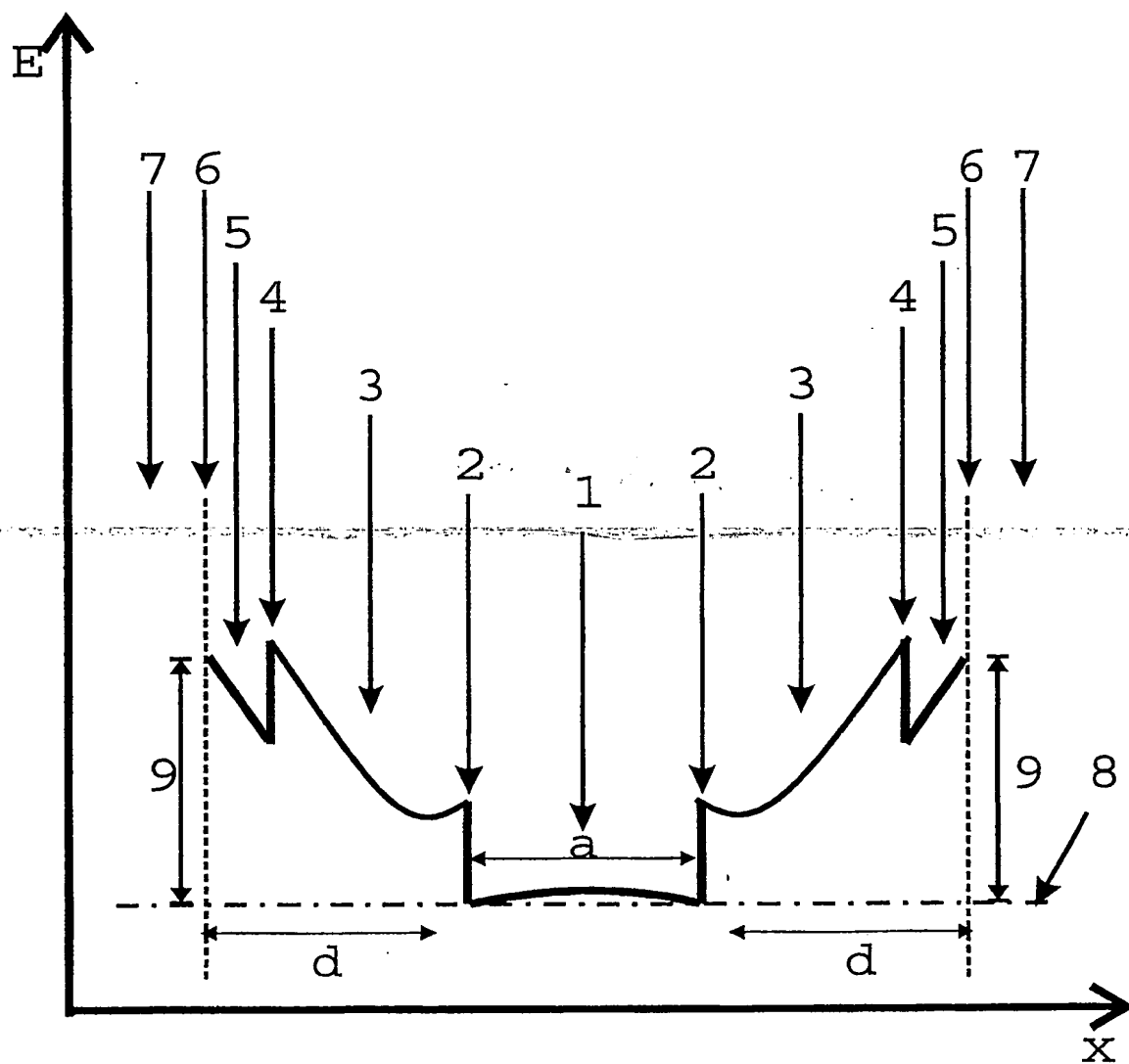
Figur 1 (Stand der Technik)

THIS PAGE BLANK (USPTO)



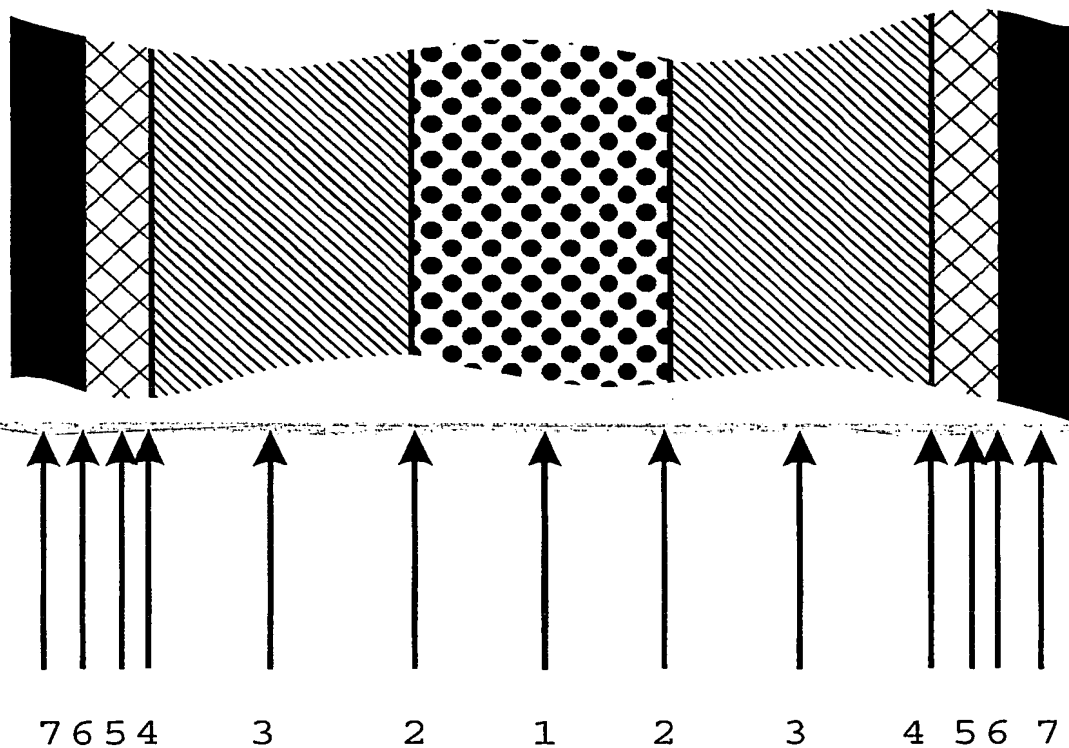
Figur 2 (Stand der Technik)

THIS PAGE BLANK (USPTO)



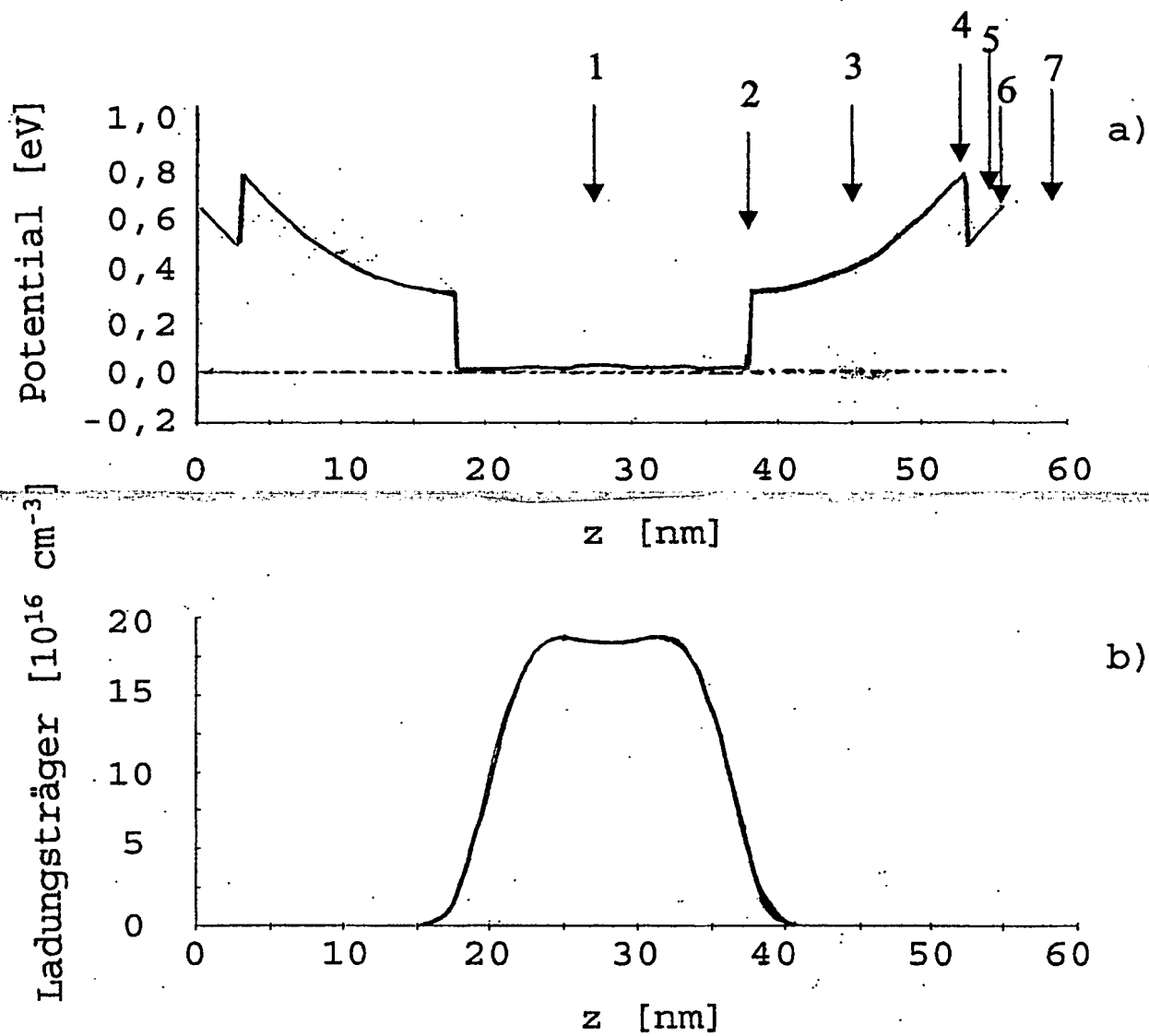
Figur 3

THIS PAGE BLANK (USPTO)



Figur 4

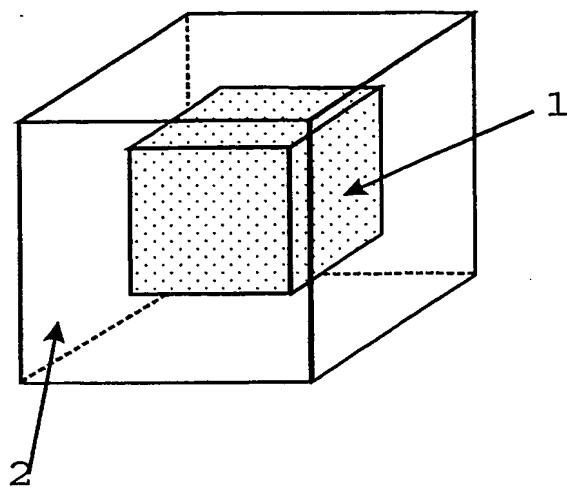
THIS PAGE BLANK (USPTO)



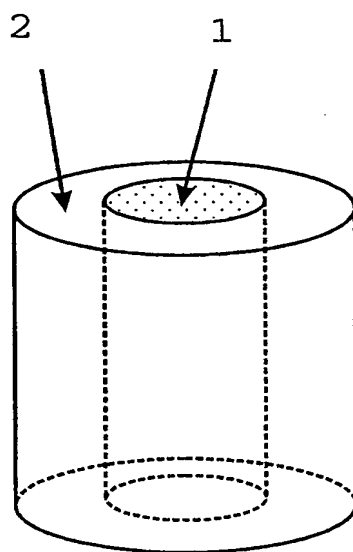
Figur 5

THIS PAGE BLANK (USPTO)

a)



b)



Figur 6

THIS PAGE BLANK (USPTO)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/DE2005/000080

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 H01L29/12 H01L29/88 H01L29/772 H01L21/335 H01L33/00
H01S5/34

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H01L H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC, COMPENDEX, IBM-TDB, PAJ, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No
X	US 2002/175408 A1 (MAJUMDAR ARUN ET AL) 28 November 2002 (2002-11-28) paragraph '0116! - paragraph '0197!; figures 2,15	1-13
X	OSAKO S-I ET AL: "QUANTUM ANTI-DOT ARRAYS AND QUANTUM WIRE TRANSISTORS FABRICATED ON INAS/AL0.5GA0.5SB HETEROSTRUCTURES" SEMICONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, INSTITUTE OF PHYSICS, LONDON, GB, vol. 11, no. 4, 1 April 1996 (1996-04-01), pages 571-575, XP000586931 ISSN: 0268-1242 abstract; figure 3	1-13
X	US 5 608 231 A (UGAJIN ET AL) 4 March 1997 (1997-03-04) figure 8	1-13

-/-



Further documents are listed in the continuation of box C



Patent family members are listed in annex

* Special categories of cited documents.

A document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

E earlier document but published on or after the international filing date

L document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

O document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

P document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

T later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

X document of particular relevance, the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

Y document of particular relevance, the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

& document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

7 July 2005

Date of mailing of the international search report

01/08/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl.
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Berthold, K

THIS PAGE BLANK (USPTO)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/DE2005/000080

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No
X	EP 0 452 950 A (HITACHI, LTD; HITACHI VLSI ENGINEERING CORPORATION) 23 October 1991 (1991-10-23) figures 1,2 -----	1-13
A	BRASLAU N: "CONTACT AND METALLIZATION PROBLEMS IN GAAS INTEGRATED CIRCUITS" JOURNAL OF VACUUM SCIENCE AND TECHNOLOGY: PART A, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 4, no. 6, 1 November 1986 (1986-11-01), pages 3085-3090, XP000615746 ISSN: 0734-2101 abstract -----	1-13
A	US 4 424 525 A (MIMURA ET AL) 3 January 1984 (1984-01-03) abstract; figures 4-6 -----	1-13
A	TU CHARLES W: "Electronic materials growth: A retrospective and look forward" JOURNAL OF VACUUM SCIENCE AND TECHNOLOGY A. VACUUM, SURFACES AND FILMS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, NEW YORK, NY, US, vol. 21, no. 5, September 2003 (2003-09), pages S160-S166, XP012006554 ISSN: 0734-2101 page S164; figure 6 -----	1-13
A	US 5 793 055 A (KASTALSKY ET AL) 11 August 1998 (1998-08-11) column 4, line 49 - line 60 -----	1-13
A	US 2003/010987 A1 (BANIN URI ET AL) 16 January 2003 (2003-01-16) claims 1,14; figure 1 -----	1-13

THIS PAGE BLANK (H8PT0)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/DE2005/000080

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2002175408	A1	28-11-2002	CA 2442985 A1	10-10-2002
			CN 1507661 A	23-06-2004
			EP 1374309 A1	02-01-2004
			JP 2004532133 T	21-10-2004
			MX PA03008935 A	30-06-2004
			TW 554388 B	21-09-2003
			WO 02080280 A1	10-10-2002
			US 2002172820 A1	21-11-2002
US 5608231	A	04-03-1997	JP 3635683 B2	06-04-2005
			JP 7176763 A	14-07-1995
EP 0452950	A	23-10-1991	JP 3020578 B2	15-03-2000
			JP 4130780 A	01-05-1992
			EP 0452950 A2	23-10-1991
			JP 3181303 B2	03-07-2001
			JP 4212489 A	04-08-1992
			US 5362972 A	08-11-1994
			JP 4118916 A	20-04-1992
US 4424525	A	03-01-1984	JP 57007165 A	14-01-1982
			JP 57013773 A	23-01-1982
			JP 56094779 A	31-07-1981
			JP 1409643 C	24-11-1987
			JP 56094780 A	31-07-1981
			JP 59053714 B	26-12-1984
			CA 1145482 A1	26-04-1983
			DE 3072175 D1	26-04-1990
			EP 0033037 A2	05-08-1981
			EP 0317993 A1	31-05-1989
			US RE33584 E	07-05-1991
US 5793055	A	11-08-1998	DE 19649500 A1	09-10-1997
			JP 9219542 A	19-08-1997
US 2003010987	A1	16-01-2003	AU 781612 B2	02-06-2005
			AU 8801501 A	02-04-2002
			CA 2391130 A1	28-03-2002
			EP 1264354 A2	11-12-2002
			WO 0225745 A2	28-03-2002
			JP 2004509475 T	25-03-2004

THIS PAGE BLANK (USPTO)

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record.**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER: _____**

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.

THIS PAGE BLANK (USPTO)